

流体圧入による間隙圧変動及び亀裂発生による浸透率変動を考慮した流体流動解析

096686 山下 恭平

指導教員 徳永 朋祥 准教授

Keywords : permeability, fracture, pore pressure, groundwater, poroelasticity

1. 背景

地下圏における流体流動解析と岩盤変形の連成解析は、石油や天然ガスの生産をはじめ、地熱発電、放射性廃棄物地層処分の安全性評価、二酸化炭素地中貯留など、様々な分野でその必要性が高まっている。実際の地下への流体圧入例としては、千葉県茂原市における地盤沈下抑制のための還元^[1]、山形県肘折地区における水圧破碎試験^[2]、新潟県長岡市における二酸化炭素地中貯留実証試験^[3]などがあげられる。これらの事例のように、近年は地下空間の利用が活発になってきているが、地下空間のモニタリング技術や数値解析技術にはまだ確立されてない部分も多い。地圏環境の持続可能な利用のためにも、現場での実測、実証実験、数値解析などによる総合的な事象把握が必要だと考えられる。その中で、流体圧入による間隙圧上昇及び有効応力の低下が引き起こす亀裂発生及び浸透率変化については評価が難しい。天然ガスや石油の増進回収の分野では、水を圧入することで貯留層を刺激し、浸透率を上げる事で生産性を上げることが1970年代から行われてきたが、数値解析上の取り扱いに関しては知見が不足している。

2. 研究目的

本研究では流体圧入による間隙圧の上昇とそれに伴う亀裂発生及び浸透率変化が流体挙動にどのように影響を与えるかを明らかにすることを目的とする。また、どのようなパラメータが亀裂発生及び間隙圧変動に影響を与えるかを考察する。

3. 支配方程式

地盤を等方・均質な多孔質媒体と仮定し、亀裂発生前は弾性的な挙動をすると支配方程式は以下のようになる。地下での流体挙動は

岩盤の弾性的な変形挙動と間隙水の流れについて連成解析を行うことで表現できる。変数は変位の2成分と間隙圧を合わせた3つであり、適切な初期値と境界条件を与える事で変形と間隙水挙動の連成問題を解くことが出来る。^[4]

$$G\nabla^2 u_i + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_k} = \alpha \frac{\partial p}{\partial t} - F_i \quad (1)$$

$$\frac{\alpha}{KB} \left(\frac{B}{3} \frac{\partial \sigma_{kk}}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) = \frac{k}{\mu} \nabla^2 p + Q \quad (2)$$

ここで、 G はせん断弾性係数、 u_i は変位ベクトル、 ν は排水条件における Poisson 比、 α は Biot-Willis 係数、 p は間隙水圧、 F_i は体積力ベクトル、 B は Skempton 係数、 K は排水条件における体積弾性率、 k は絶対浸透率、 μ は間隙流体の粘性係数、 Q は単位時間当たりの多孔質媒体内における湧き出し流量である。式(1)は力の釣り合いを表しており、式(2)が間隙水の質量保存式を表している。

4. 亀裂発生の判定

亀裂の発生はモール・クーロンの破壊基準に従うこととする。泥層は実験結果を用いる^[5]。砂層については、内部摩擦角は一般的な値である 30° とし、粘着力は $1(\text{kgf}/\text{m}^2)$ とした。

$$\tau = 31.7 + \sigma' \tan 10.3^\circ (\text{kgf}/\text{cm}^2) \quad (3)$$

$$\tau = 1 + \sigma' \tan 30^\circ (\text{kgf}/\text{cm}^2) \quad (4)$$

τ はせん断応力を表し、 σ' は等方圧縮有効応力を表す。式(3)は泥層の破壊基準であり、式(4)が砂層の破壊基準である。亀裂の発生時には浸透率が2倍^[6]になると仮定して解析を行った。

5. モデル概要

(1) 想定地

モデルは南関東ガス田の位置する千葉県茂原市における上総層群の地層を参考に作成した。南関東ガス田は水溶性天然ガス田であり、生産量及び埋蔵量において日本最大である。また、世界のヨウ素の 40%を算出している。しかしながら、それらの生産のための地下水過剰採取による地盤沈下が地域的な問題になっている。昭和 47 年に企業と行政の間で地盤沈下防止例が締結され、地下水の還元圧入が行われている。また、この地域は RITE(2005)の定める二酸化炭素地中貯留の想定地にもなっており、将来的に大量の流体圧入が行われる可能性もある。以上の背景から本研究では上総層群の地層や物性を参考にモデルを作成した。

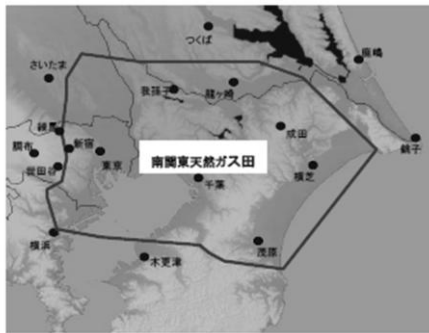


図 1 南関東ガス田

(2) 解析モデル

解析は鉛直二次元平面ひずみ条件で行う。モデルは砂泥互層を想定し、水平方向 30km、深度方向 2km とした(図 2)。深度 950m～1150m の砂層の中心に流体の圧入を行うと仮定した。

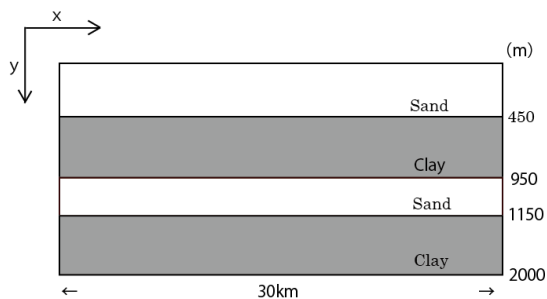


図 2 解析モデル概要

(3) 初期値・境界条件

初期値については、変位は各軸方向 0 とし、初期の間隙水圧は静水圧分布に従うとした。変位の境界条件は側面は x 方向の変位を 0 とし、底面は y 方向の変位を 0 とした。上面は Traction free とした。圧力の境界条件は上面を大気圧、側面を十分遠方だと考え静水圧とし、底面は基盤と考え NO FLOW とした。

6. 解析と結果

(1) 解析ソフト

解析は支配方程式等の構成が自作できる汎用有限要素法解析ソフト COMSOL Multiphysics を使用して解析を行った。

(2) 物性値

解析には上総層群における一般的な物性値を用いた。

表 1 解析に用いた物性値

排水条件のポアソン比	0.3	流体の粘性(Pa/s)	0.001
排水条件のヤング率(MPa)	500	間隙率	0.4
水の密度(kg/m ³)	1000	水の体積弾性率(Gpa)	2.3
砂の密度(kg/m ³)	2700	固相の弾性率(Gpa)	36

(3) 解析手順

始めに上総層群の一般的な値である Case1、泥層の浸透率が低い Case2、砂層の浸透率が高い Case3 と浸透率を変えた 3 パターンについての解析を行った。それぞれについて、亀裂発生による浸透率変化を考慮する場合と考慮しない場合について解析を行った。

表 2 各 Case の浸透率設定

Case	砂層(md)	泥層(md)
1	50	0.01
2	50	0.001
3	100	0.01

解析条件としては圧入量を 0.04kg/s/m とし⁷⁾、圧入期間は 10 年間とした。圧入後 10 年後における過剰間隙水圧、亀裂発生範囲、体積ひずみなどから考察を行った。

(4) ケーススタディの考察

解析の結果、全ての場合で亀裂発生による浸透率変化を考慮した場合の方が 10 年後における坑底圧の上昇値が 0.65 倍程度と低かった。また、浸透率変化を考慮した方がより遠方まで亀裂が発生していた。これは、浸透率があがることで、間隙圧が伝播しやすくなっ

たためだと考えられる。また、泥層では浸透率が高いほど、間隙水が侵入し破壊を引き起こすことがわかった。泥層をシール層と考えるような圧入の場合には浸透率の低い層を選ぶことが安全性の観点から重要になると思われる。亀裂発生については主に砂層で発生しており、上総層群のような物性値であれば、泥層における破壊はほぼ起こらないと考えられる。また、泥層内では圧力が一時的に下がる Reverse water-level fluctuations の影響が見られた(図 3)。

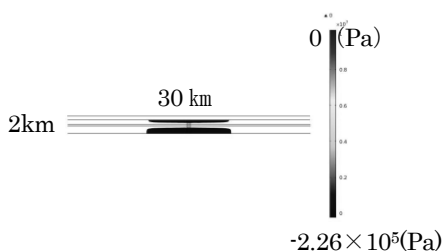


図 3 間隙圧からの変動が負の部分

ケーススタディでの結果を受け、浸透率が地下での流体挙動に大きな影響を与えていると考え、貯留層の浸透率を 20、50、80、100、120(md)と変えて解析を行った。泥層の浸透率は 0.01(md)とし、10 年間 0.04kg/s/m 圧入した。その結果、浸透率変化を考慮した方が坑底圧の上昇は小さく全てで 0.65 倍程度だった(図 4)。圧入点から亀裂が発生している一番遠い地点までの距離は、浸透率変化を考慮しない場合は浸透率が増えるにつれ増えていくが、逆に浸透率変化を考慮する場合は浸透率が増えるにつれ小さくなっていく(図 5)。これは浸透率変化を考慮すると、亀裂発生地点で圧力が拡散しやすくなるためだと思われる。

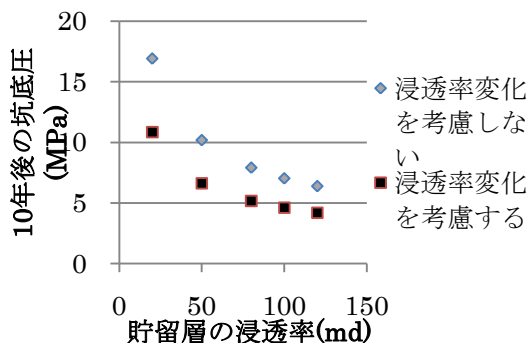


図 4 圧入から 10 年後の坑底圧 (MPa)

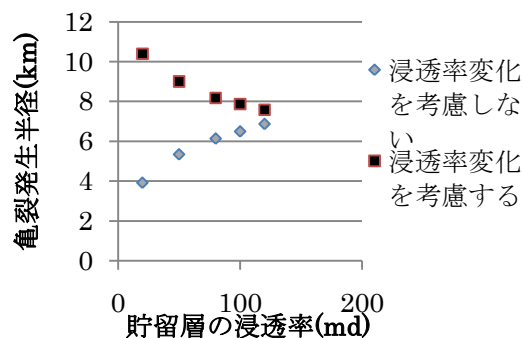


図 5 圧入から 10 年後の亀裂発生半径 r(km)

次に貯留層厚さと坑底圧の関係について感度分析を行った。貯留層は地下 1000m を中心に広がり、上部、下部は泥層が続くこととした。貯留層厚さを 25m、50m、100m、150m、200m と変えて解析をしたところ、泥層に浸透率を与えた場合と 0 にした場合で結果に差が出た。石油業界などでは一般に流動坑底圧力は貯留層幅に反比例するとされているが、今回の解析結果では泥層に浸透率を与えない場合は反比例に近くなるが、泥層に Case1 と同じ 0.1(md)の浸透率を与えたところ異なる結果が得られた。泥層の浸透率が低いのは確かだが、境界面の圧力が高くなる部分では間隙流体が浸透することで圧力の拡散が起きているためと考えられる。また、今回の解析結果では貯留層の層厚が厚いほど泥層の浸透率に対する依存性は低くなった(図 6)。

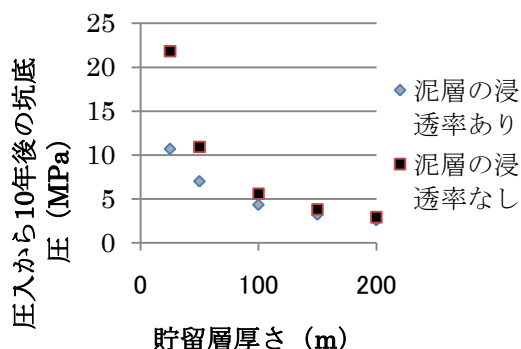


図 6 貯留層厚さと坑底圧(MPa)の関係

次に、Case1 と同じ設定で 10 年間圧入した後、圧入を停止し、10 年間圧入量 0 として解析を行った。圧入が終了した時点では圧入点を中心に砂層内での間隙圧上昇が大きかったが、時間が経つにつれ、泥層内及び砂層の

遠方へと圧力が拡散した。圧入終了時点(10年後)では間隙水圧の静水圧からのずれ最大値は圧入点の+3.6 (MPa) だったが、20年後には泥層との境界面で過剰間隙水圧が最大となり、+1.7 (MPa) 程度となった。今回は一相流の解析であるが、二相流解析では毛管圧が働くため、より、その違いが顕著になることが予測される。圧入終了後も応力分布が変わるため継続したモニタリングが地圏環境の把握には必要だと考えられる。

最後に、Case1 と他は同じ条件で、亀裂発生時の浸透率変化を 1.5 倍、2.5 倍、3 倍、5 倍と変えて解析を行った。浸透率変化を大きくすると 10 年後の坑底圧も減少していつているが(図 7)、亀裂発生半径は 6.2 km 前後に漸近しているように見える(図 8)。これは、圧入量と場の物性値が同一であれば、圧入により伝わる力のポテンシャルに限界があるためではないかと思われる。

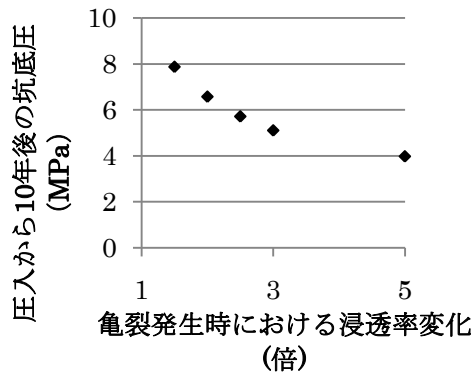


図 7 浸透率変化と坑底圧(MPa)の関係

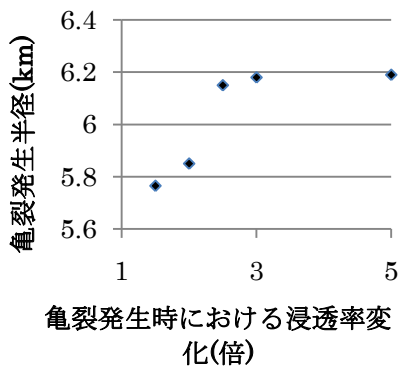


図 8 浸透率変化と亀裂発生半径との関係

7. 結言

本研究では流体流動と岩盤変形の解析に、亀裂発生による浸透率変化を組み合わせた解析を試みた。また、解析結果に影響が大きいと予想される要因について感度分析を行った。

亀裂発生時に浸透率変化を考慮すると応力場がかわることで間隙圧変動や亀裂発生範囲に差が出る事がわかった。また、浸透率や貯留層厚さも間隙圧挙動に影響を与えることがわかった。

今後、より正確な地下流体流動を把握するためには、亀裂の発生による浸透率の変化の知見を貯め、数値解析上で適切に扱えるようにすればよい。

参考文献

- [1] 堀口 克実 (1998) . 千葉県の水溶性天然ガスフィールドの現状. 石油技術協会誌. Vol.6. NO6.
- [2] Shunji Sasaki (1998). Characteristics of microseismic events induced during hydraulic fracturing experiments at the Hijiori hot dry rock geothermal energy site, Yamagata, Japan . Tectonophysics. Volume 289. P171-188.
- [3] 柳瀬 大爾, 薛 自求, 嘉納 康二 (2008). 長岡における二酸化炭素圧入実証実験. Journal of MMIJ. Vol.124. P50-62.
- [4] M.A. Biot (1941). General theory of three-dimensional consolidation. Applied. Physics. Vol 12. p155-164.
- [5] 細野 高康(1993). 上総層群中部層シルト岩の強度・変形特性. 応用地質. 34 巻 第 5 号 P25-36.
- [6] 熊倉聡, 木山 保, 西本 壮志, 石島 洋二, 藤井 義明 (2007) . 破壊した来待砂岩の透水性変化に関する研究. 資源と素材学会 平成 19 年度春季大会講演集 (I) , P111-112.
- [7] J. Rutqvist C.F. Tsang (2002), A study of caprock hydromechanical changes associated with CO₂-injection into a brine formation. Environmental Geology. 42. P296-305.